

华南典型湿热气候区的人体热舒适性研究

东莞理工学院 胡钦华[☆]

西安建筑科技大学 丁秀娟

东莞理工学院 李奎山

西安建筑科技大学 郑庆红

摘要 采用实验室研究的方法对华南地区的人体热舒适性进行了研究。通过对不同性别、不同年龄、不同地区的人体热舒适进行分析,得出性别在舒适区域对人体热舒适性影响不大,不同职业及年龄对人体热舒适影响较大,尤其是不同职业的影响。根据本文实验研究的特点,通过粗略的统计方法得出 80% 满意率的作用温度范围,与 ASHRAE 55—1992 和 ISO 7730 标准进行比较后得出,本次实验的舒适区域要宽泛一些,相对湿度对热感觉的影响要高于前人的结论。

关键词 热感觉 热舒适 热舒适区域

Research on human thermal comfort for warm-wet climate zones in South China

By Hu Qinhua[★], Ding Xiujuan, Li Kuishan and Zheng Qinghong

Abstract Performs the researches by a laboratory method. Through the analysis of different gender, ages and regions of human thermal comfort, concludes that gender has little influence on thermal comfort, while different ages and especially different occupation have notable influence on thermal comfort. According to the characteristic of this experimental study, obtains 80 percent satisfied zones and compares with those in the ASHRAE 55—1992 and the ISO 7730 standards, and the results show that the comfort zone from this experiment is wider, and the impact of relative humidity on the thermal sensation is obvious than previous.

Keywords thermal sensation, thermal comfort, thermal comfort zone

★ Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong Province, China

①

0 引言

热环境是影响人体热舒适性的主要因素,迄今为止,许多实验室和现场研究都表明中国人和美国人、欧洲人在热感觉和热期望等方面都存在显著的差异。由此可见,我们不能完全照搬欧美等国家的热舒适标准,而应研究适于中国人的生活条件、生活习惯的热舒适性指标。由于我国地域辽阔,南北跨越热、温、寒几个气候带,气候类型

多种多样,各地区居民生活习惯不同,地区之间经济发展不平衡,人们的经济承受能力不同,以及人

①[☆] 胡钦华,男,1977 年 1 月生,博士研究生,讲师
523808 广东省东莞市松山湖大学路 1 号东莞理工学院教务处
(0) 13712365110
E-mail: qinhuahu@sina.com
收稿日期:2007-08-16
修回日期:2007-11-26

体适应能力的不同,必将导致人们对热环境的评价产生差异。故应对不同地区的居室环境、人体热感觉分别进行实验研究。

针对以广州为代表的典型的南方城市,当地居民对室内热环境的要求与北方城市居民对室内热环境的要求势必存在差异,若要系统地研究适合中国人的热舒适标准,在各个气候区域进行大范围的实验调查研究是必不可少的。

1 人体热舒适的实验室研究

1.1 方案的选择与确定

人体热舒适研究主要采用两种方法:实验室研究和现场调查研究。实验室研究能够很好地测量和控制热环境,可以更加突出地研究某一个或几个变量对人体热舒适性的影响程度,但是专业人士对这种研究方法得出的结果逐渐产生了质疑。而在现场调查研究中,很难准确地确定受试者的衣服热阻和新陈代谢率。由于以上原因,研究者们通常把实验室研究和现场调查研究结合起来,用现场调查研究的结果来校核实验室研究结果的有效性。本文根据实际需要采用实验室研究的方法,同时又与以往实验室研究方法有一些不同,尽可能避免实验室研究本身的缺点造成的影响。

本次实验室研究设计方案的不同点是:首先,受试者的穿着和平时一样,没有统一服装;其次,受试对象不再是单一的在校大学生,包括从 15~60 岁之间的各个年龄段,其中也包括了不同的职业;再次,受试对象大多数为广东省本地人,少数为广东以外的。

本次实验在东莞理工学院实验室进行。

1.2 受试者背景资料

受试者必须身体健康才能参加实验,其基本资料如表 1 所示。

1.3 问卷调查内容

包括受试者的个人资料:身高、体重、年龄、常住地(从出生到现在居住时间最长的地方)以及常住性质,热感觉投票,舒适度投票和受试者对周围热环境的空气流速的投票。由于现实生活中很少有人能够准确表达自己的热感觉,如暖和稍暖,即使专业人士也未必能够准确判断,如果让受试者填写的内容越多,受试者被动不情愿会造成一些负面影响,所以热感觉投票并没有采用ASHRAE

表 1 受试者背景资料

		男	女	总体
人数/人	总和	123	115	238
	广东	73	68	141
	广东以外	50	47	97
年龄/岁	最大值	60	59	60
	最小值	19	18	18
	平均值	36. 819 7	35. 413 8	36. 134 5
体重/kg	最大值	94	65	94
	最小值	44	32. 5	32. 5
	平均值	64. 313 0	51. 926 1	58. 327 7
身高/cm	最大值	195	171	195
	最小值	145	150	145
	平均值	169. 636 2	158. 887 0	164. 442 2

标准中的七个等级标准^[1],而是采用更易于受试者理解的五点指标(很冷,有点冷,正常,有点热,很热)表达自己的热感觉。热舒适投票没有采用以往的五点指标(不可忍受,很不舒服,不舒服,稍不舒服,舒服),而是简化为三点指标(很不舒服,不舒服,舒服)。受试者对周围热环境空气流速的投票同样简化为更易于人们理解的三点指标(太小,适中,太大)。

受试者的衣服热阻和活动量。在实验过程中受试者没有穿着统一服装,而是按照自己平时的穿着进行实验,因此衣服热阻会有些偏差。为了具有统一性,把穿长袖的受试者衣服热阻估计为 0. 7 clo,穿短袖的受试者衣服热阻估计为 0. 5 clo,其中包括椅子的附加热阻 0. 15 clo(椅子类似沙发座椅,因此附加热阻取最大值^[2])。在实验期间,受试者处于静坐阅读报纸杂志或聊天状态,尽可能接近实际生活中坐着的工作状态,根据成年男子在不同活动强度条件下的代谢率,估计此时的受试者新陈代谢率为 1. 0 met^[2]。

1.4 实验室室内参数(见表 2)

表 2 实验室室内参数

	最大值	最小值	平均值	标准差
空气温度 $t_a/^\circ\text{C}$	28. 6	18. 2	23. 768 2	2. 798 1
黑球温度 $t_g/^\circ\text{C}$	30. 1	18. 4	24. 780 7	10. 438 0
湿球温度 $t_w/^\circ\text{C}$	24. 9	14. 9	20. 278 4	3. 074 9
相对湿度 $\varphi/\%$	90. 2	56. 3	71. 74	0. 075 5
平均辐射温度 $t_r/^\circ\text{C}$	32. 8	18. 6	24. 958 0	3. 030 0
作用温度 $t_o/^\circ\text{C}$	30. 7	18. 4	24. 363 1	2. 857 6
空气流速 $v/(\text{m/s})$	0. 91	0. 01	0. 315 7	0. 255 5
预测平均投票 PMV	1. 506	-4. 235	-0. 949 8	1. 311 5

以上参数的测点位置都是在高度 0. 6 m 左右,分别由 TA-5 热风速仪和黑湿球温度仪测出,

平均辐射温度及 PMV 值根据 Fanger 热舒适方程编制的程序计算得出,作用温度是空气温度和辐射温度的平均值。

1.5 实验过程

受试者首先在准备室休息 15 min 左右,让受试者处于一种平静状态下再进入实验室正式测试。准备室温度一般控制在 25~26 °C 之间,让受试者处于同一种状态下进入实验室。在准备室休息期间实验人员为受试者讲解实验注意事项及要求,讲解问卷调查内容及填写方式。

每次实验人数为 12 人,6 男 6 女,受试者正式进入实验室后,男女交替而坐,保证每个测试区域男女人数相等。静坐大约 15 min 后,受试者填写第一份调查问卷,同时实验人员测试室内参数。受试者填完问卷后由实验人员收回,然后调节室内温度,温度稳定后,进行第二次问卷调查,以此类推。整个实验过程进行 4 次问卷调查,实验室内温度控制在 4 个范围值之内,18~20 °C,20~22 °C,22~24 °C,26~31 °C,根据实际情况,每次问卷会在 4 个范围值之间波动,力求找出各种人群的舒适温度范围。每次实验过程最多持续 90 min,因为在 90 min 后很难保证受试者处于一种平常心态来接受调查。

2 实验结果

2.1 根据热感觉投票确定 80% 人体热舒适区域

在本次实验中,由于没有采用七点指标,所以在统计受试人员 80% 的满意率时,把有点冷和有点热的 50% 投票值归入热感觉正常的行列。如图 1,2 所示。

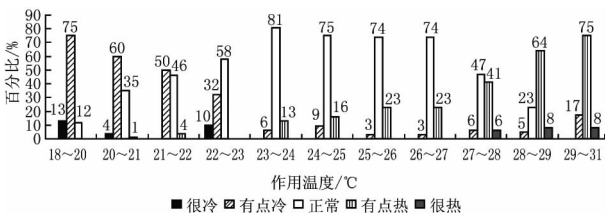


图1 男性在不同作用温度下的热感觉

从图 1 和图 2 可以看出,男性和女性热感觉达到 80% 可接受的正常范围,作用温度范围均为 $t_o = 23 \sim 27$ °C。ASHRAE 55—1992 舒适标准中夏季舒适区的 $t_o = 22.6 \sim 26$ °C,从这种粗略的统计方法上来看,广东省热舒适范围下限要比 ASHRAE 55—1992 标准高 0.4 °C,上限也相应地高 1 °C 左

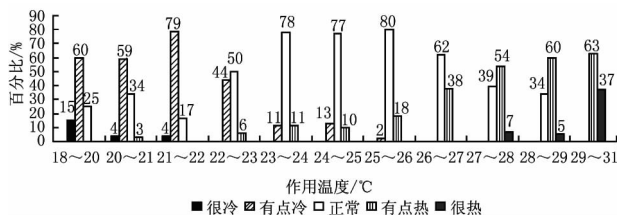


图2 女性在不同作用温度下的热感觉

右。ISO 7730 标准中夏季舒适温度范围是 $t_o = 23 \sim 26$ °C,和此次实验结果相比,下限基本符合,上限要低 1 °C 左右。

2.2 根据热舒适投票确定 80% 满意率的温度范围

由于热舒适指标的简化,在本次实验数据统计时,把指标“不舒服”的 50% 划分到满意的范围内。受试者在不同作用温度下的热舒适投票值见图 3,4。

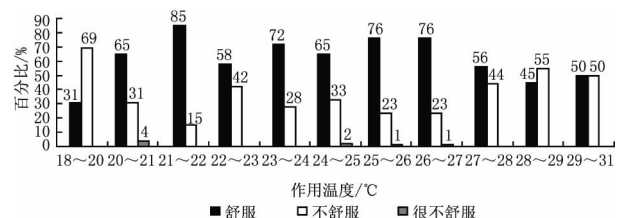


图3 男性在不同作用温度下的热舒适

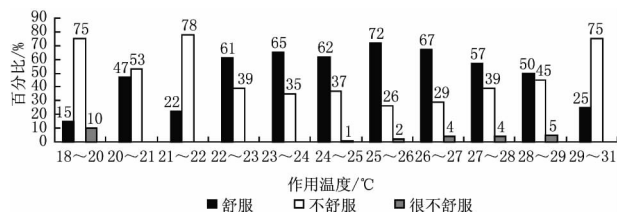


图4 女性在不同作用温度下的热舒适

可以看出,男性达到 80% 满意率的作用温度范围为 20~27 °C,在 27~28 °C 时,也有 78% 的男性感到满意;女性达到 80% 满意率的作用温度范围为 22~27 °C,在 27~28 °C 时,有 76% 的女性感到满意。

与 ASHRAE 55—1992 标准中的舒适区 $t_o = 22.6 \sim 26$ °C 和 ISO 7730 标准舒适区 $t_o = 23 \sim 26$ °C 相比,本实验舒适区温度范围有不同程度的扩大。与以热感觉投票确定的舒适区域 $t_o = 23 \sim 27$ °C 相比,上限没有变化,但下限都有不同程度的扩大。

从图 3,4 可以直观地看出男性在 20~28 °C,

舒服比不舒服占的百分比大,而女性在 22~29℃,舒服比不舒服占的百分比大。这样看来,所有受试者舒服比不舒服多的作用温度范围为 22~28℃。

2.3 不同性别之间的热舒适差异

不同性别热感觉线性回归统计见表 3,男性的实测和预测热中性温度分别为 24.23℃和 26.62℃;女性的实测和预测热中性温度分别为 24.11℃和 26.61℃;总体的实测和预测热中性温度分别为 24.28℃和 27.15℃。从男女热中性温度来看,差异不大,说明性别对热感觉的影响不大,男性热中性温度比女性热中性温度高 0.12℃。

表 3 不同性别热感觉线性回归统计

		线性回归公式	相关系数	显著水平
实测	男	$MTS=0.178t_o-4.313$	0.861 0	0.000 1
	女	$MTS=0.183t_o-4.413$	0.827 0	0.000 1
	总体	$MTS=0.156t_o-3.788$	0.820 9	0.000 1
预测	男	$PMV=0.417t_o-11.099$	0.922 1	0.000 1
	女	$PMV=0.358t_o-9.525$	0.896 9	0.000 1
	总体	$PMV=0.334t_o-9.068$	0.881 4	0.000 1

2.4 不同年龄之间的热舒适差异

表 4 给出了不同年龄热感觉的线性回归统计,为了使年龄分段明显,分为 3 个年龄段,年龄段 1 为 10~20 岁,年龄段 2 为 21~40 岁,年龄段 3 为 41~60 岁。

表 4 不同年龄段热感觉线性回归统计

		线性回归公式	相关系数	显著水平
实测	年龄段 1	$MTS=0.198t_o-4.682$	0.726 3	0.000 1
	年龄段 2	$MTS=0.164t_o-4.003$	0.800 8	0.000 1
	年龄段 3	$MTS=0.191t_o-4.563$	0.833 6	0.000 1
预测	年龄段 1	$PMV=0.448t_o-11.910$	0.902 9	0.000 1
	年龄段 2	$PMV=0.339t_o-8.978$	0.874 6	0.000 1
	年龄段 3	$PMV=0.408t_o-10.876$	0.913 7	0.000 1

从表 4 可以计算出不同年龄的实测和预测热中性温度。年龄段 1 的实测和预测热中性温度分别为 23.65℃和 26.58℃;年龄段 2 的实测和预测热中性温度分别为 24.41℃和 26.48℃;年龄段 3 的实测和预测热中性温度分别为 23.89℃和 26.66℃。从实测的热中性温度来看,年龄段 1 和年龄段 3 相差不大,而年龄段 2 与年龄段 1,3 相差较大。

笔者认为这主要是由以下原因造成的:1) 年龄段 1 主要是在校大一学生,人数较少,由于他们

的活动量较大造成新陈代谢率较高,导致他们认为在温度较低的环境下较舒服,这和通常人们的说法“年轻耐冷”吻合。2) 年龄段 2 主要包括一部分在校大学生和学校的后勤工作人员,这部分人平时在空调环境下生活时间较短,长时间生活在较热的环境下造成他们对室内热环境期望度不高。另一方面原因是年龄段 2 的人正处于中青年期,他们的忍耐力较强,要求的舒适温度范围也较广。3) 年龄段 3 主要是在校的一些老师,他们在空调环境下生活时间较长,对室内热环境的舒适性要求较高。另一方面,由于实验过程中没有统一服装,年龄段 2 中有一部分学生穿着较少,如短裙、短袖。而年龄段 3 中老师一般穿着较厚,如长裙、长裤等,以上原因造成了他们的热中性温度较低。这和人们的通常说法“年龄较大的人更喜欢暖一点的环境”相违背,在这要说明的是,这一说法应该是针对老年人,而不是针对还没有退休的中老年人。

从这一实验结果也可以看出,虽然本次实验结果是按年龄段进行处理的,但实验结果的差异却主要是不同职业及人的适应性造成的。虽然本次实验涉及到不同年龄段、不同职业,但由于受试对象很难在同一时间进行实验,造成不同职业和不同年龄的人相对集中,在以后的实验中应该尽可能避免这种情况,力求达到在每个年龄段中都有不同职业的人员。

2.5 不同地区之间的热舒适差异

表 5 给出了不同地区热感觉的线性回归统计,根据表 5 可知,常住地为广东的人的实测和预测热中性温度分别为 24.18℃和 26.62℃;常住地为广东以外的人的实测和预测热中性温度分别为 24℃和 26.62℃。

表 5 不同地区热感觉的线性回归统计

		线性回归公式	相关系数	显著水平
实测	广东	$MTS=0.192t_o-4.643$	0.868 7	0.000 1
	广东以外	$MTS=0.185t_o-4.440$	0.789 7	0.000 1
预测	广东	$PMV=0.385t_o-10.249$	0.907 2	0.000 1
	广东以外	$PMV=0.424t_o-11.288$	0.915 6	0.000 1

从这两组数据可以看出,常住地对热感觉影响不大,可能是由以下原因引起的:常住地为广东以外的受试者也在东莞住了 2~3 年,基本上适应了当地的热环境。除此之外,虽然常住地是广东以外,但大多数城市都属于南方城市,北方城市占

很小比例,这也会造成一些影响。单从实测热中性温度来看,常住地为广东的热中性温度比广东以外的热中性温度高 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,虽然差异不大,但这种趋势是合理的。

2.6 相对湿度和温度对热感觉影响的程度

在本次实验中,把相对湿度和空气温度进行多元回归,得出两者对热感觉的比重值,并将此结果与天津大学学生和美国学生进行对比,具体结果见表 6。

表 6 温湿度比重值

分 类	多元回归公式	比 重		
		空气温度 β_t	相对湿度 β_h	β_t/β_h
实测 女	$MTS=0.163\ 5t_a+2.130\ 8\varphi-5.418\ 4$	0.816 4	0.529 5	1.541 8
值 男	$MTS=0.173\ 1t_a+0.215\ 5\varphi-4.2592$	0.841 5	0.391 5	2.149 4
总体	$MTS=0.175\ 1t_a+1.034\ 8\varphi-4.8862$	0.849 4	0.451 3	1.882 1
天津 女	$MTS=0.337\ 7t_a+1.339\ 5\varphi-0.990\ 0$	0.9273	0.229 8	4.034 6
学生 男	$MTS=0.292\ 8t_a+1.1912\varphi-7.769\ 5$	0.904 6	0.229 9	3.934 2
总体	$MTS=0.311\ 8t_a+1.341\ 1\varphi-8.376\ 7$	0.919 2	0.247 0	3.720 7
美国 女	$MTS=0.167t_a+1.000\varphi-9.698$	0.907	0.103	8.8
学生 男	$MTS=0.134ta+1.000\varphi-7.044$	0.868	0.132	6.6
总体	$MTS=0.151t_a+1.000\varphi-8.371$	0.886	0.116	7.6

从统计结果来看,本次结果与天津大学学生和美国学生的测试结果相比,相对湿度对热感觉的影响较大,且相对湿度对女性的影响要比男性大,原因可能是女性比男性更敏感造成的。许多学者的研究表明,当人体的活动量较小、空气温度不是很小时,相对湿度对人体舒适性的影响可以不予考虑,如 Nevins 等人对美国学生做的实验结果温湿度的比重值为 $7.6:1^{[3]}$,蒋薇对天津大学学生做的实验结果温湿度比重值为 $3.72:1^{[4]}$,本次实验温湿度比重值为 $1.88:1$ 。

从对比结果可以看出,在中国南方城市(湿热气候区),相对湿度对热感觉的影响较大。产生差异较大的原因主要是:首先,受试者类型不同,本次实验受试对象包括不同年龄不同职业的人群,而 Nevins 等人和蒋薇的实验受试对象只有学生。其次,实验环境的相对湿度不同,本次实验过程中环境的相对湿度为 $56.3\%\sim 90\%$,平均值为 71.74% ;天津学生进行实验过程中环境相对湿度为 $30\%\sim 76\%$ 。南方城市相对湿度高的特点决定了实验环境相对湿度的设置。

2.7 各种影响因素对热感觉的相关性分析

综上所述,本次实验主要研究了性别、年龄、地区等因素对人体热感觉的影响,为了和以往实验结

果相对比,把空气温度和相对湿度对热感觉的影响也作了一定的相关性分析。表 7 是本次实验得出的各种影响因素对热感觉影响的相关系数,可以看出对热感觉影响最大的是空气温度和性别,其次是地区和年龄,相对湿度的影响是最小的。

表 7 相关系数表

性别	地区	年龄	空气温度	相对湿度
0.844 0	0.829 2	0.786 9	0.849 4	0.451 3

3 结论

3.1 按热感觉投票统计,男性和女性达到 80% 满意率的作用温度范围均为 $23\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 按热舒适投票统计,男性达到 80% 满意率的作用温度范围为 $20\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$,女性则为 $22\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与以热感觉投票确定的男性和女性舒适区域($23\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$)相比,上限没有变化,但下限都有不同程度地扩大。

3.3 男性的实测和预测热中性温度分别为 $24.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.62\text{ }^{\circ}\text{C}$;女性的实测和预测热中性温度分别为 $24.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.61\text{ }^{\circ}\text{C}$;总体的实测和预测热中性温度分别为 $24.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $27.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 年龄段 1 的实测和预测热中性温度分别为 $23.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.58\text{ }^{\circ}\text{C}$;年龄段 2 的实测和预测热中性温度分别为 $24.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.48\text{ }^{\circ}\text{C}$;年龄段 3 的实测和预测热中性温度分别为 $23.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这一结果受不同职业的影响。

3.5 常住地为广东的实测和预测热中性温度分别为 $24.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.62\text{ }^{\circ}\text{C}$;常住地为广东以外的实测和预测热中性温度分别为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $26.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.6 本次实验得出的相对湿度与空气温度的比重值为 $1:1.88$ 。相对湿度对受试者的影响程度要高于前人所得出的结论。

3.7 对热感觉影响最大的因素是空气温度及性别,其次是地区和年龄,相对湿度的影响相对其他因素要小一些。

参考文献:

- [1] 黄晨,龙惟定. 建筑环境学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:189~220
- [2] 朱颖心,彦启森. 建筑环境学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [3] Nevins R G, Rohles F H. A temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons [G]// ASHRAE Trans,1966, 72(2)
- [4] 蒋薇. 人体热舒适性实验研究[D]. 天津:天津大学,2001